



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Porovnání metod a přístrojů pro měření deformace horniny

Bakalářská práce

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy
Autor práce: **Jaromír Paulů**
Vedoucí práce: doc. Ing. Milan Hokr, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechatronics, Informatics
and Interdisciplinary Studies ■

Comparison of methods and equipment for rock deformation measurement

Bachelor thesis

Study programme: B2612 – Electrical Engineering and Informatics
Study branch: 2612R011 – Electronic Information and Control Systems
Author: **Jaromír Paulů**
Supervisor: doc. Ing. Milan Hokr, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jaromír Paulů**
Osobní číslo: **M11000168**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronické informační a řídicí systémy**
Název tématu: **Porovnání metod a přístrojů pro měření deformace horniny**
Zadávající katedra: **Ústav nových technologií a aplikované informatiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s principem, vlastnostmi a použitím přístrojů pro měření posunu na puklině včetně způsobu záznamu dat (strunové, LVDT, úchylkoměry, záznamníky DLCH10, Comet, Geokon)
2. Ověřte vybranou sestavu senzoru a záznamníku v laboratoři, otestujte přesnost a stabilitu měření, funkčnost záznamu
3. Ve spolupráci se školitelem vyberte místo a osadte vybraná měřidla v terénu s doplněním nebo úpravou konstrukce dle potřeby
4. Porovnejte mezi sebou výhody a nevýhody použitých čidel, záznamníků a řešení upevnění, soustřeďte se na vliv teploty a možnosti tepelné kompenzace čidla a konstrukce

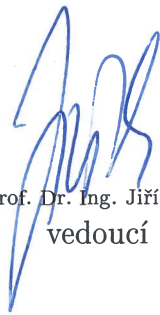
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **30-40 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

- [1] Beran L. (2012): Datalogger DLCH10 záznamová ústředna s ethernet grafickým rozhraním, Funkční vzorek, Technická Univerzita v Liberci.
[2] Micro-Epsilon: Instruction Manual induSensor, LVDT, www.micro-epsilon.de
[3] DUNNICLIFF, J.; GREEN, G. E. Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. New York : Wiley, 1993. ISBN: 0471005460 9780471005469.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Milan Hokr, Ph.D.**
Ústav nových technologií a aplikované informatiky
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Miloš Hernych**
Ústav mechatroniky a technické informatiky
Datum zadání bakalářské práce: **20. října 2014**
Termín odevzdání bakalářské práce: **15. května 2015**


prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.
děkan




prof. Dr. Ing. Jiří Maryška, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 20. října 2014

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval těm, kteří svou pomocí přispěli ke vzniku této práce, především za vedení práce doc. Ing. Milanu Hokrovi, Ph.D. Také bych chtěl poděkovat celé své rodině, zejména svým rodičům a své sestře za podporu během celého studia.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá měřením deformace horniny ve vodárenském přivaděči Bedřichov v návaznosti na měření z roku 2012, které v rámci ročníkového projektu provedl Jan Votápek. V teoretické části popisuje principy a vlastnosti přístrojů, které jsou nebo by mohli být využity ve štolě Bedřichov. Praktická část je zaměřena na měření deformace horniny ve štolě Bedřichov. Dále na otestování LVDT senzoru od firmy MICRO-EPSILON v laboratoři. Také popisuje výběr místa a osazení zařízení pro měření malých posuvů ve třech osách ve štolě. Výsledkem práce je zpracování naměřených dat, porovnání senzorů a vyhodnocení výhod jednotlivých senzorů při vlivu teploty a možnosti tepelné kompenzace čidel či konstrukce.

Klíčová slova

Bedřichov, Datalogger DLCH10, dilatometr, LVDT, tepelná kompenzace, úchylkoměr

Abstract

The Bachelor Thesis deals with measurement of rock deformation in the water-supply tunnel Bedřichov following to measurement of 2012, which in the context of a class project carried out by Jan Votápek. The teoretical part of the thesis describes principles and characteristics device, which already are in the tunnel or could be used to in the tunnel Bedřichov. The practical part of the thesis is focused on measuring rock deformation in the tunnel Bedřichov. And further testing of LVDT sensor from MICRO-EPSILON company in laboratory. The practical part of the thesis describes also a place selection and mounting systems for measuring small displacement along three axes in the tunnel. The result of the Bachelor Thesis is data processing, sensors's comparison and evaluation of sensors's advantages of individual sensors under the influence of temperature and the possibility of temperature compensation sensor or construction.

Key words

Bedřichov, Datalogger DLCH10, dilatometer, LVDT, temperature compensation, gauge

Obsah

Úvod.....	12
1 Principy a vlastnosti použitých přístrojů	13
1.1 Snímače LVDT	13
1.1.1 Princip LVDT.....	13
1.1.2 MSC 710	14
1.2 Úchylkoměr	16
1.2.1 Princip úchylkoměru	16
1.2.2 Zařízení pro měření malých posunů ve třech osách.....	17
1.3. Geokon Model 4422 Monuments Crackmeters	19
1.3.1 Princip sondy.....	19
1.3.2 Datalogger Geokon Model LC-2 Single Channel	20
1.4 Datalogger DLCH10	21
1.4.1 Vzdálený přístup přes VNC	23
2 Testovací měření.....	25
2.1 Konstrukce	25
2.2 Zhodnocení měření.....	26
3 Výběr místa a osazení zařízení pro 3-osé měření posunu.....	29
4 Vyhodnocení měření.....	32
4.1 Geokon	32
4.2 Měření posunu 3-osým zařízením	35
5 Porovnání přístrojů pro měření deformace	41
Závěr	43
Seznam použité literatury.....	45

Seznam obrázků

<i>Obr. 1: Sensor Controller a senzor [2]</i>	14
<i>Obr. 2: Schéma Sensor Controlleru [2]</i>	15
<i>Obr. 3: Příklady rozsahů MSC 710 [2]</i>	16
<i>Obr. 4: Příklad digitálního úchylkoměru [3]</i>	16
<i>Obr. 5: 3D Model zařízení pro měření ve třech osách [3]</i>	17
<i>Obr. 6: Hroty úchylkoměrů doléhající na opracovaný povrch</i>	18
<i>Obr. 7: Technický výkres opracované krychle ze zařízení pro 3-osé měření posunu [3]</i>	18
<i>Obr. 8: Fotka ze štoly – varianta uchycení soustavy</i>	19
<i>Obr. 9: Geokon Model 4422 Monuments Crackmeters [6]</i>	20
<i>Obr. 10: Datalogger Geokon LC-2 Single Channel [7]</i>	21
<i>Obr. 11: Fyzické provedení dataloggeru [8]</i>	23
<i>Obr. 12: Příklad plochy ve VNC Vieweru</i>	24
<i>Obr. 13: Soustava pro testovací měření LVDT senzoru</i>	26
<i>Obr. 14: Panoramatická fotografie ze stanoviště 278 m před upevněním</i>	29
<i>Obr. 15: Uchycená konstrukce</i>	30
<i>Obr. 16: Uchycení držáku konstrukce</i>	31
<i>Obr. 17: Umístění sondy Geokon na 278 m štoly</i>	32
<i>Obr. 18: Rozměry konstrukce a popis os</i>	35
<i>Obr. 19: Pohyb konstrukce vlivem dilatace horniny</i>	40

Seznam tabulek

<i>Tab. 1: Přehled připojených vstupních a výstupních modulů s označením kanálů [8]</i>	22
<i>Tab. 2: Naměřené a vypočítané hodnoty LVDT senzoru</i>	27
<i>Tab. 3: Naměřená a upravená data Geokonu</i>	33
<i>Tab. 4: Naměřené hodnoty zařízení pro 3-osé měření posunu</i>	36
<i>Tab. 5: Vypočtené hodnoty délkové roztažnosti v ose x</i>	39

Seznam grafů

<i>Graf 1: Poměr d_1, d_2.....</i>	<i>27</i>
<i>Graf 2: Linearita posunu na výstupním napětí.....</i>	<i>28</i>
<i>Graf 3: Vliv teploty na posun v čase.....</i>	<i>34</i>
<i>Graf 4: Vývoj napětí baterie a teplot v čase.....</i>	<i>34</i>
<i>Graf 5: Posuny ve třech osách v závislosti na čase.....</i>	<i>37</i>
<i>Graf 6: Posun v prostoru v závislosti na teplotě.....</i>	<i>37</i>
<i>Graf 7: Porovnání naměřené hodnoty a hodnoty s vlivem dilatace.....</i>	<i>40</i>
<i>Graf 8: Porovnání posunů v ose x a čase.....</i>	<i>41</i>

Úvod

Tématem této bakalářské práce je měření deformace horniny ve vodárenském přivaděči Bedřichov (dále jen štola Bedřichov). Štola Bedřichov se nachází v Jizerských horách a její délka je 2600 m a je ražená v žulovém masivu v hloubce až 150 m . Díky tomu poskytuje dobré příležitosti pro měření fyzikálních jevů v hornině (proudění vody, vedení tepla, deformace). Práce navazuje na ročníkový projekt Jana Votápky, který jako součást ročníkového projektu v roce 2012 umístil do štoly dva strunové dilatometry Geokon na místa 235 m a 278 m od začátku štoly.

Cílem teoretické části práce je seznámení s přístroji, které jsou, nebo by bylo možné ve štole použít. Pro sběr dat byl zvolen datalogger DLCH10 Ing. Leoše Berana, Ph.D. V praktické části pracujeme se senzorem LVDT, který testujeme v laboratoři a zjišťujeme jeho možné využití ve štole. K tomuto laboratornímu měření bylo potřeba vytvořit vhodnou konstrukci k otestování senzoru. Dále hledáme vhodné místo pro instalaci sestavy navrhnoutou Ing. Tomášem Pluhařem, která využívá digitálních úchylkoměrů a měří posuv ve třech osách. U této sestavy musíme počítat s teplotní roztažností, neboť úchylkoměry jsou osazeny na železné konstrukci. Z hlediska výběru místa je důležité, aby se v daném místě měření, objevovala puklina adekvátní velikosti a nejlépe i další přístroje pro porovnání měření. Zároveň je potřeba, aby v tomto místě byl přístup k elektrické energii. Při zpracování naměřených dat jsou pro nás nejdůležitější parametry teploty ve štole, teploty senzoru a posuv pukliny, který je minimální v jednotkách μ metrů.

Motivací pro vypracování je nahlédnutí do problematiky měření, tak malých posuvů několika možnými způsoby. Zajímavá je možnost hromadného sběru dat pomocí dataloggeru DLCH10, který umožňuje sběr dat až z deseti kanálů. Pomocí VNC Vieweru lze sledovat data na senzorech živě z jakéhokoliv počítače s připojením k internetu. VNC Viewer je aplikace pro vzdálenou administraci a správu počítače.

Cílem práce je zvolené senzory porovnat mezi sebou a zjistit výhody a nevýhody či možnost použití. Důležité je soustředit se na vliv teploty a možnost tepelné kompenzace.

1 Principy a vlastnosti použitých přístrojů

V této části práce se teoreticky zabývám všemi použitými přístroji a jejich vlastnostmi a využitím ve škole. Konkrétně se jedná o:

- LVDT MSC 710 firmy MICRO-EPSILON,
- zařízení pro měření posunu ve třech osách,
- Geokon Model 4422 Monuments Crackmeters,
- datalogger DLCH10.

1.1 Snímače LVDT

Zkratka LVDT (Linear Variable Defferential Transformer) je označení pro odolné magnetické snímače. Jedná se o indukčnostní senzory s otevřeným magnetickým obvodem. Využívají se pro měření malých posunů v řádech jednotek μm , ale i posuny o několik desítek cm.

1.1.1 Princip LVDT

V této podkapitole jsem vycházel z [1]. Využívá změny magnetického toku v lineárním proměnném diferenciálním transformátoru. Senzory se skládají z dutého válce a tyčky. Tyčka se volně pohybuje uvnitř dutého válce. Dutý válec je tvořen soustavou tří cívek, kde první cívka tvoří primární vinutí, druhá a třetí jsou zapojena v sérii a vyvedeny jako sekundární vinutí. Druhá a třetí cívka jsou zapojeny v protifázi, a tak se jejich napětí odečítají. Na pohyblivé tyčce uvnitř jádra je připevněno feromagnetické jádro. Primární vinutí je umístěno mezi oběma sekundárními vinutími, je napájeno konstantním sinusovým signálem o stejném napětí a frekvenci. Samotný pohyb tyčky pak způsobuje změnu magnetického toku, a tedy i hodnotu indukovaného napětí na obou sekundárních vinutích. Z toho tedy vyplývá, že když je feromagnetické jádro uprostřed obou sekundárních vinutí, jejich indukované napětí má stejnou hodnotu a vzájemně se vyruší. Naopak, když je jádro blíže k jednomu či druhému vinutí, uvidíme na výstupu rozdílové napětí stejné frekvence jako na primárním vinutí, kde amplituda bude odpovídat rozdílu napětí na sekundárních vinutích. Identifikace směru pohybu je možná, díky fázovému posuvu dílčích signálů o 180° , a tím od sebe odlišit obě

sekundární vinutí. Tím se dá určit, zda se předmět přibližuje či oddaluje. Výhodou je dlouhá životnost, spolehlivost a vysoké rozlišení.

1.1.2 MSC 710

MSC 710 je měřicí systém od firmy MICRO-EPSILON, který využívá principu LVDT. Systém se skládá ze Sensor Controlleru a samotného LVDT senzoru (viz obr. 1). Balení ještě obsahuje anglický manuál a šroubovák.



Obr. 1: Sensor Controller a senzor [2]

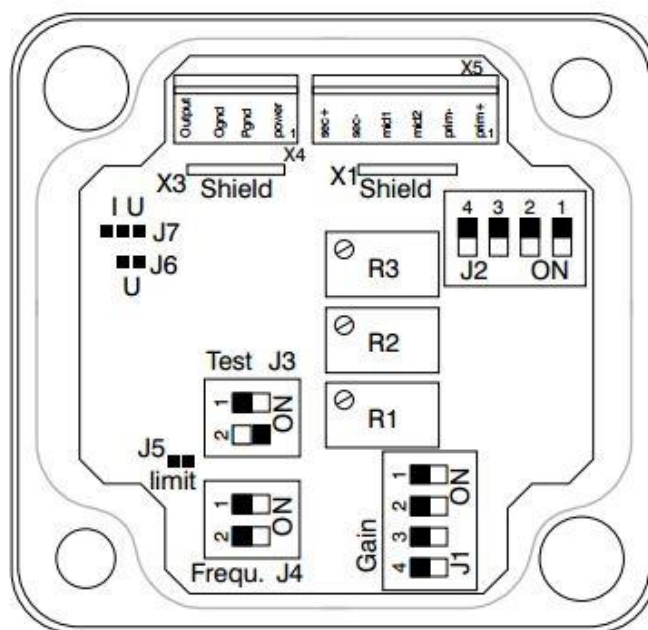
Technické parametry udávány výrobcem [2]:

- napájecí napětí $18 \dots 30 \text{ VDC}$,
- proudový vstup $18 \dots 45 \text{ mA}$,
- napěťový výstup $2 \dots 10 \text{ VDC}$,
- proudový výstup $4 \dots 20 \text{ mA}$.

Senzor MSC 710 má volně pohyblivou tyč. V případě, že se tyč pohybuje směrem do válce, výstupní napětí se zvětšuje. Opačný případ má za následek snížení výstupního napětí. Měřicí postup v senzoru probíhá bezdotykově, díky čemuž nedochází k opotřebení a je prodloužená životnost. Výrobce udává, že vhodné prostředí pro použití je při teplotě 0 do $+70 \text{ }^{\circ}\text{C}$, vlhkosti od 5 do 95 \% při běžném atmosférickém tlaku [2].

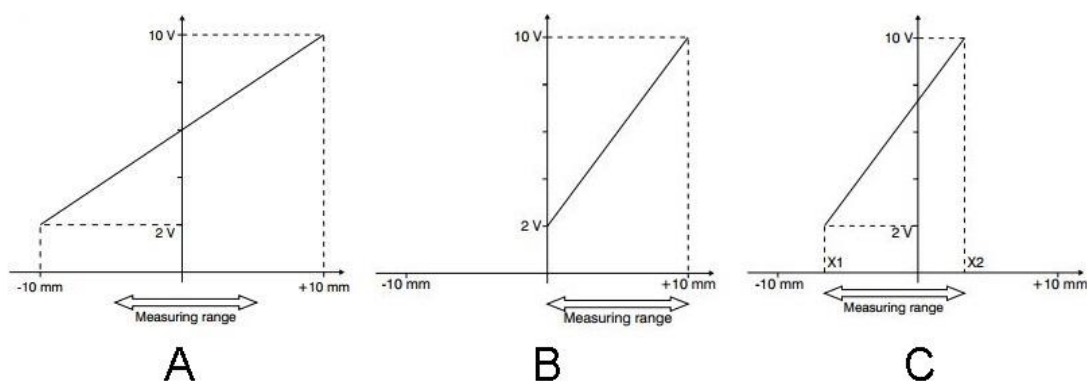
Sensor Controller slouží k nastavení využití senzoru. Senzor je kabelem připojen do Sensor Controlleru na signálové dráty pomocí svorkovnice X4, X5.

Po odšroubování krytu Sensor Controlleru vidíme na plošné desce spoje svorkovnice, přepínače a odporové potenciometry (viz obr. 2). Přepínače slouží k nastavení měřícího rozsahu (*J1*), frekvence oscilátoru (*J4*) a fáze (*J2*). Odporové potenciometry *R1*, *R2*, *R3* slouží ke kompenzaci, nastavení pracovní nuly pro měření a zpřesnění výstupních dat. Sensor Controller má přepětíovou ochranu a je také chráněn proti přepólování napájecího napětí.



Obr. 2: Schéma Sensor Controlleru [2]

K Sensor Controlleru mohou být připojeny senzory různých rozsahů. Senzory jsou dodávány s rozsahy $\pm 1\text{ mm}$, $\pm 3\text{ mm}$, $\pm 5\text{ mm}$, $\pm 10\text{ mm}$, $\pm 15\text{ mm}$ a $\pm 25\text{ mm}$. Návod obecně uvádí tři příklady měření pro využití rozsahu (viz obr. 3). V příkladu A se využívá celý měřící rozsah $\pm 10\text{ mm}$, tedy 20 mm pro výstupní napětí od 2 do 10 VDC. Příklad B využívá stejné výstupní napětí, ale kvůli menšímu rozsahu od 0 do 10 mm získává větší počet vzorků a tedy větší přesnost na daném rozsahu. Výstupní napětí v příkladu C zůstává stejné. Výhodou je variabilita v nastavení senzoru, kde na rozsahu $\pm 10\text{ mm}$ mohu nastavit jakýkoliv požadovaný rozsah se startovní pozicí *X1* a koncovou pozicí *X2* [2].



Obr. 3: Příklady rozsahů MSC 710 [2]

1.2 Úchylkoměr

Je délkové měřidlo, které neměří absolutní délku, ale rozdíl od nastavené hodnoty v rozlišení až tisíciny milimetru. Úchylkoměry mohou být standardní analogové a digitální, nebo analogové a digitální páčkové. Jejich nejčastější využití můžeme najít ve strojírenství. Hovorově se jim také říká hodinky. Využívají se například při uchycení svěráku na frézku či CNC stroj, při vyrovnání odchylky vřetene s osou. Dále se tak kontroluje správné uchycení polotovaru do svěráku, univerzály či čtvrté osy. Pro tato měření je nejvhodnější páčkový úchylkoměr.



Obr. 4: Příklad digitálního úchylkoměru [3]

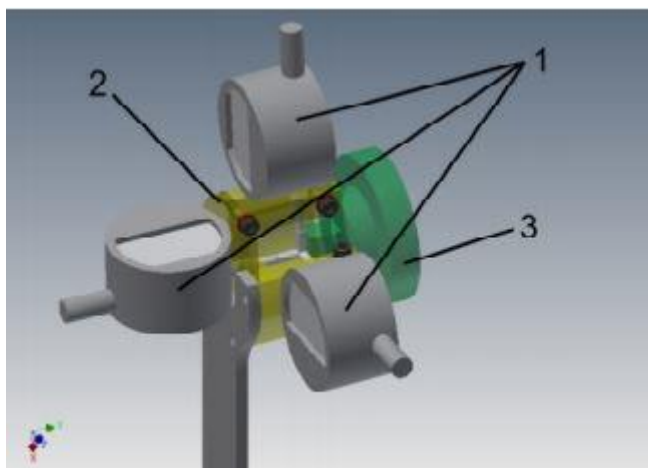
1.2.1 Princip úchylkoměru

U číselníkového úchylkoměru se pohyb měřicího doteku převádí pomocí několika ozubených kol na ručičku. Pro správné měření je důležité dodržet kolmost k měřené ploše a být nad osou rotační osy. Ke správnému měření lze použít různé stojany a úchyty.

1.2.2 Zařízení pro měření malých posunů ve třech osách

Jedná se o sestavu, kterou navrhl Ing. Pluhař. Jeho cílem bylo vytvořit zařízení pro měření malých posunů ve třech osách [3]. Přičemž princip celého zařízení měl také umožňovat jednoduchým způsobem přenášet a ukládat data elektronické podobě. Měl tím nahradit dosavadní způsob používaný ve štolě Bedřichov, a tím byla optická metoda [4]. Tato metoda je sice přesná, ale vyhodnocení konkrétních posunů je příliš komplikované.

Základní princip využívá kombinace tří úchylkoměrů a měření ve třech na sobě kolmých osách. Proto bylo vytvořeno zařízení, které obsahuje tři úchylkoměry (1), část ke které jsou úchylkoměry napevno připevněny (2) a část, na kterou kolmo dosedají hroty úchylkoměrů (viz obr. 5) [3].

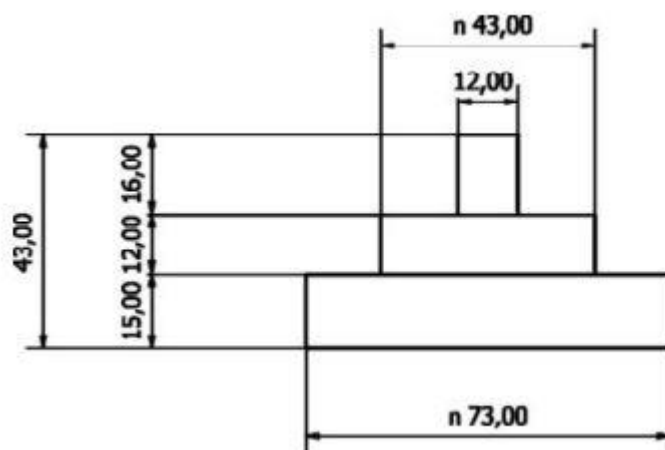


Obr. 5: 3D Model zařízení pro měření ve třech osách [3]

Samotná konstrukce je řešena tak, že úchylkoměry jsou na pevno připevněny do hliníkové konstrukce. Hliníková konstrukce je přivařena k nerezové konstrukci, která se na pevno uchytí na tři šrouby do horniny. Druhou část tvoří strojně opracovaná hliníková krychle, která se nikterak nedotýká druhé hliníkové konstrukce, ale dosedají na ní pouze hroty úchylkoměrů (viz obr. 6). Technický výkres druhého dílu vidíme na obrázku 7. Tato část je přivařena na pohyblivou nerezovou konstrukci, která umožní přichycení ve dvou bodech na tři šrouby (viz obr. 8).



Obr. 6: Hroty úchylkoměrů doléhající na opracovaný povrch



Obr. 7: Technický výkres opracované krychle ze zařízení pro 3-osé měření posunu [3]



Obr. 8: Fotka ze štoly – varianta uchycení soustavy

1.3. Geokon Model 4422 Monuments Crackmeters

Firma Geokon vyrábí celou řadu spolehlivých a vysoce kvalitních přístrojů, využitelných v geotechnickém monitoringu.

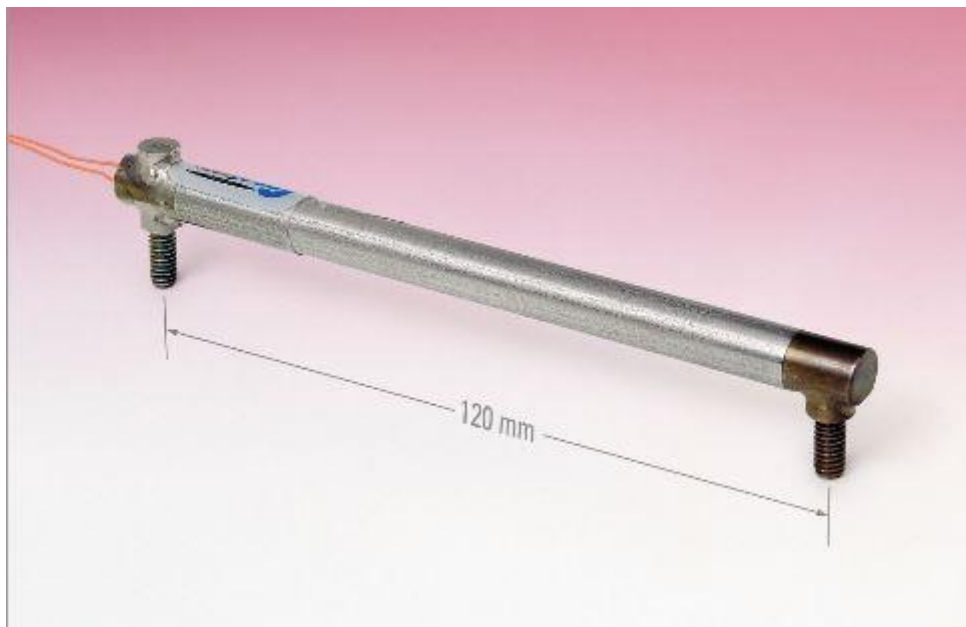
Geokon Model 4422 Monuments Crackmeters se již ve štole Bedřichov nachází. Ve školním akademickém roce 2011/2012 ji jako součást svého ročníkového projektu osadil na místo Jan Votápek [5]. Ten měl za úkol, změřit posuny pukliny na pozicích 235 m a 278 m od začátku štoly. V těchto místech již od roku 2004 probíhalo měření přístroji TM71. Toto měření probíhalo odečtem hodnot každých 14 dní. Na základě tohoto měření vznikla nutnost spojitého měření na těchto úsecích.

Sonda je navržena pro měření puklin ve skále, pro posuvy zdí na domech atd. Vhodné využití je též na památkách, kde je pro své malé rozměry nenápadná [6]. Nevýhoda sondy je v tom, že je vyrobena v USA, kde nevyužívají metrický systém, ale angloamerický. Je tedy problematické sehnat správné vybavení jako matice, šrouby, atd.

1.3.1 Princip sondy

Geokon Model 4422 Monuments Crackmeters (obr. 9) pracuje na principu strunových tenzometrů. Zařízení se skládá z napěťové pružiny, která je uchycena k vibračnímu drátu na jednom konci a na druhém s ojnící. Principem činnosti strunových tenzometrů je změna frekvence vlastních kmitů ocelové struny předpjaté mezi dvěma body vyvolaná změnou mechanického napětí. Ke změně napětí dochází při

deformaci struny, která je způsobena posunutím uchycených konců. Faktickým výstupem sondy je elektrické napětí, které datalogger převádí na posun. Díky nepropustnému plášti pracuje až do tlaku $1,7 \text{ MPa}$ [6].



Obr. 9: Geokon Model 4422 Monuments Crackmeters [6]

1.3.2 Datalogger Geokon Model LC-2 Single Channel

Ke sběru dat ze sondy slouží Datalogger Geokon Model LC-2 Single Channel (obr. 10). Datalogger ukládá hodnoty jako stav baterie, teplotu dataloggeru, teplotu sondy, rok, měsíc, den, hodinu, minutu, sekundu a hlavně hodnotu posuvu sondy. Pro sběr dat je k dataloggeru dodáván software LogView, který umožňuje nastavení měření včetně názvu sondy, názvu dataloggeru, formát stahování dat atd. [7].



Obr. 10: Datalogger Geokon LC-2 Single Channel [7]

1.4 Datalogger DLCH10

Datalogger DLCH10 (obr. 11) vyvinul Ing. Leoš Beran Ph.D. Je určen pro měření fyzikálních veličin s cílem možnosti připojení více senzorů se standardním napěťovým nebo proudovým výstupem. Jeho největší výhodou je vzdálené ovládání pomocí internetového připojení. Pro využití vzdáleného ovládání to zároveň vyžaduje internetové připojení na místě měření, což může být problematické.

Datalogger má 10 kanálů. Dva pro měření deformace, jeden odporový a teplotní pro PT100, čtyři proudové a 2 dva napěťové. Na proudové a napěťové kanály je možné připojit většinu senzorů. Zařízení umožňuje ovlivnit svými výstupy měřený proces. Akčními členy jsou dva digitální výstupy 24 V, dvě spínací relé a dva triaky. Pomocí vzdáleného přístupu můžeme tyto členy ovládat a sledovat odezvu na provedené akční zásahy.

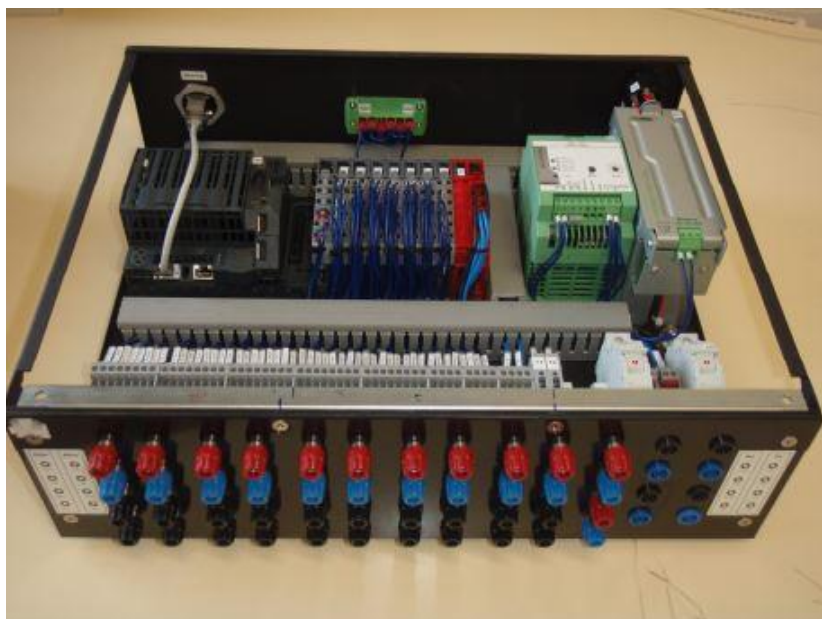
Tab. 1: Přehled připojených vstupních a výstupních modulů s označením kanálů [8]

Č. kanálu	Označení modulu	Veličina	Rozsah	Parametry
CH1	X20AI1744	Deformace	1,4 V	
CH2		Deformace	1,4 V	
CH3	X20AT2311	Odpor	0.5 až 390 Ω	
CH4		teplota PT100	-200 až 850 $^{\circ}\text{C}$	
CH5	X20AI2437	Proud	4 až 20 mA	
CH6		Proud	4 až 20 mA	
CH7	X20AI2437	Proud	4 až 20 mA	
CH8		Proud	4 až 20 mA	
CH9	X20AI2237	Napětí	± 10 V	
CH10		Napětí	± 10 V	
D01	X20D02322	-		24 V, 0.5 A
D02		-		24 V, 0.5 A
K1	X20D02649	-	5.0 A, 30 VDC /5.0 A, 230 VAC	
K2		-	5.0 A, 30 VDC /5.0 A, 230 VAC	
T1	X20D02633	-	12 - 240 VAC, 2 A	
T2		-	12 - 240 VAC, 2 A	

Časová základna pro měření je 1 s. Ze vztahu pro frekvenci (1) tedy můžeme po dosazení časové základny určit maximální frekvenci vzorkování tedy 1 Hz.

$$f = \frac{1}{t} \quad (1)$$

Data jsou ukládána na CF (Compact Flash) kartu v podobě datových objektů. Tato data je možno exportovat do formátu CSV (Comma-Separated Values – data oddělené čárkami) a stáhnout pomocí FTP (File Transfer Protocol) do počítače a s daty pracovat. Datalogger je chráněn proti výpadku elektrického proudu záložní baterií, která krátkodobě udrží datalogger při chodu. V případě delšího výpadku elektrické energie bude po obnovení měření automaticky spuštěno. O výpadku informuje uživatel datalogger skrze naměřená data [8].

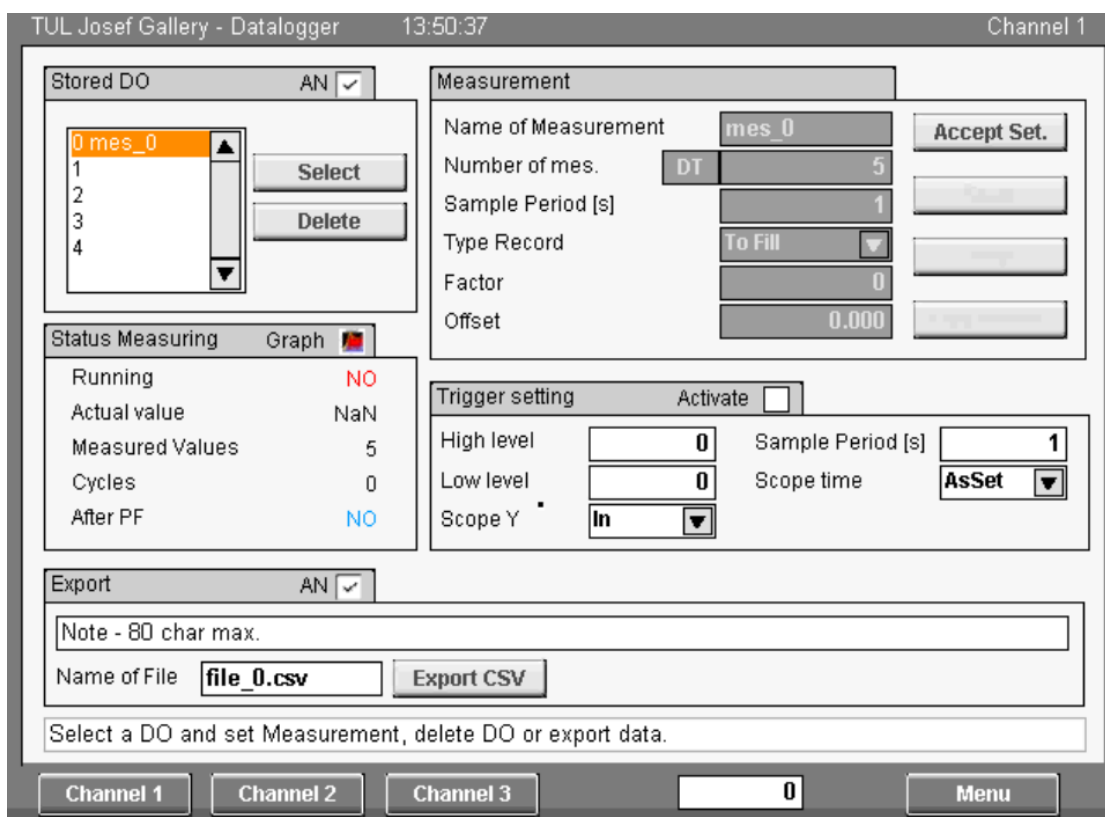


Obr. 11: Fyzické provedení dataloggeru [8]

Vhodné využití na dlouhodobý i krátkodobý monitoring. Důležité k jeho využití je zázemí, tedy, aby byl přístup k elektrické energii a připojení k internetu. Spektrum využití je široké od měření teploty, vlhkosti, až po deformace horniny. Zkrátka všech čidel využívajících proudový nebo napěťový výstup.

1.4.1 Vzdálený přístup přes VNC

Datalogger má systém založený na *PLC X20CP1486* od firmy B&R a využívá procesor *Inter Celeron*. VNC (Virtual Network Computing) je program, který umožňuje vzdálený přístup do *PLC* přes grafické rozhraní do počítače. Mezi nejčastěji používané programy patří například *VNC Viewer*, *UltraVNC* či *RealVNC*. VNC se skládá ze serveru, klienta a komunikačního protokolu. Server je program, který sdílí svoji obrazovku. Klient ovládá server a zobrazuje sdílenou plochu. Protokol řeší přenos dat, kde přenáší pouze změny, ke kterým dojde u klienta. Pro přihlášení do *VNC Vieweru* stačí zadat IP adresu dataloggeru, přihlašovací údaje a heslo. Poté lze zařízení vzdáleně ovládat, kontrolovat naměřená data nebo učinit akční zásah do měření.



Obr. 12: Příklad plochy ve VNC Vieweru

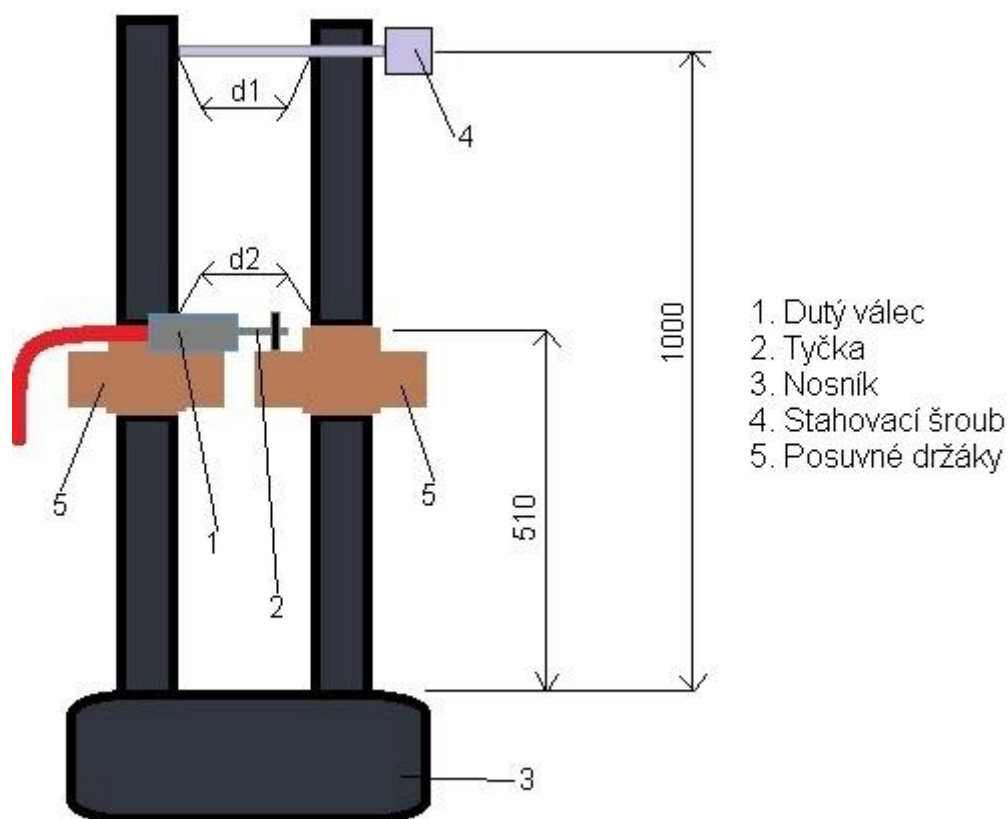
Ve VNC Vieweru můžeme nastavovat parametry jako frekvence vzorkování, pozici, na kterou chci ukládat data, název měření, počet naměřených vzorků, zvolení faktoru. Faktor je hodnota, kterou dělíme naměřená data, abychom převedli konkrétní hodnotu na fyzikální veličinu. Ve své podstatě se jedná o posun řádu, naměřené veličiny. Můžeme zde sledovat všech 10 kanálů. Každý kanál lze zobrazit i v grafice, kde je zobrazena osa času a osa měřené veličiny. Funkce triggeru slouží ke sledování speciálních případů v daném měření. Může se jednat o minimální či maximální naměřenou hodnotu. Je zde i tlačítko pro uložení výstupních dat do CF paměti (viz 1.4). V této části jsem vycházel z [8] a vlastních zkušeností se softwarem.

2 Testovací měření

Cílem testovacího měření bylo otestovat senzor LVDT MSC 710 od firmy MICRO- EPSILON, před použitím v praxi seznámit se s jeho použitím. Použitý senzor pro otestování byl *DTA-ID-1,5-CA*, jehož měřicí rozsah je $\pm 1 \text{ mm}$. Dle návodu lze využít tři různé možnosti nastavení rozsahu (viz kapitola 1.1.2). Bylo zvoleno nastavení pro příklad C (viz obr. 3), a nastavení měřicího rozsah $\pm 0,75 \text{ mm}$.

2.1 Konstrukce

Pro konstrukci k otestování LVDT senzoru, byl zvolen dvojitý nosník. Na každém rameni byl nasazen posuvný držák (viz obr. 13). Posuvné držáky byly umístěny do výšky 510 mm ramen nosníku. Na jedno rameno dvojitého nosníku byl napevno připevněn dutý válec a na druhé rameno tyčka LVDT senzoru. Při umísťování tyčky na druhé rameno bylo potřeba umístit tyčku senzoru v půli rozsahu. Tato pozice se kontrolovala výstupním napětí LVDT senzoru, které odpovídalo hodnotě 6 VDC . Výstupní napětí, bylo měřeno pomocí voltmetru připojeného na Sensor Controller. Toto napětí šlo korigovat pomocí odporových potenciometrů v Sensor Controlleru.



Obr. 13: Soustava pro testovací měření LVDT senzoru

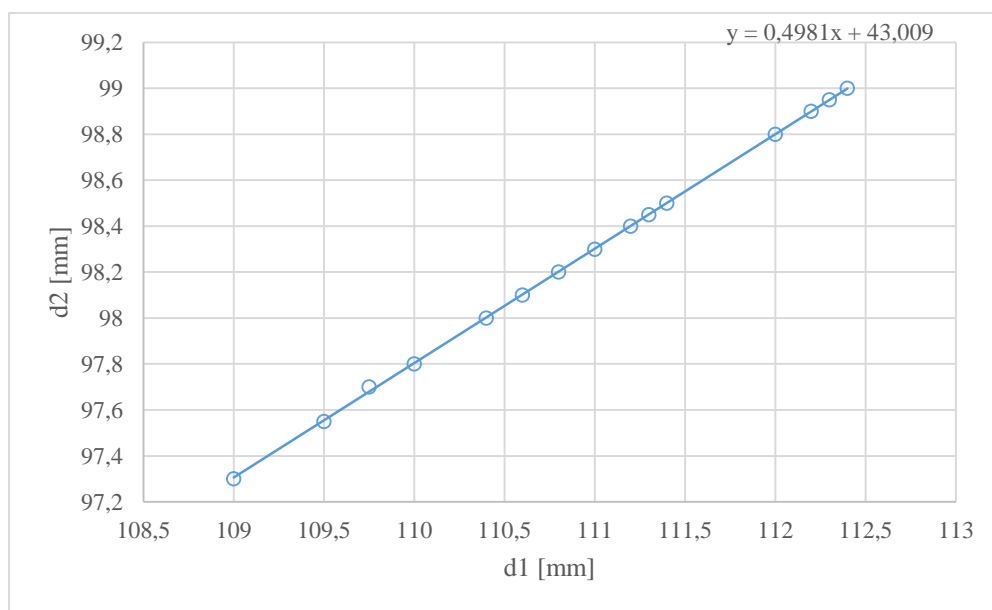
2.2 Zhodnocení měření

Utahováním a povolováním šroubu s metrickým závitem $M5$ byly roztahovány konce nosníků. Tímto způsobem se průhybem měnila výchylka v místě uložení senzoru. Měřenými parametry byla vzdálenost ramene v místě senzoru $d2$, a vzdálenost ramene u stahovacího šroubu $d1$. Celý rozsah výstupního napětí od 2 do 10 VDC byl několikrát proměřen a v tabulce 2 seřazen pro vhodné zpracování dat. Hodnota Δd v tabulce je rozdíl hodnoty $d2$ od zvolené referenční hodnoty $d2$ z naměřeného výstupního napětí 2V. Je to hodnota, která by měla odpovídat naměřené hodnotě posunu LVDT senzorem. V tabulce jsou spočítané hodnoty výchylek $\Delta d1$ a $\Delta d2$. Jsou to rozdílové hodnoty mezi řádky sloupců $d1$ a $d2$. Měření vzdálenosti probíhalo pomocí posuvného měřítka a výstupní napětí pomocí voltmetru.

Tab. 2: Naměřené a vypočítané hodnoty LVDT senzoru

d1 [mm]	$\Delta d1$ [mm]	d2 [mm]	$\Delta d2$ [mm]	Δd [mm]	U [V]	Θ [%]
109	-	97,3	-	1,5	10	0
109,5	0,5	97,55	0,25	1,25	8,63	-0,458
109,75	0,25	97,7	0,15	1,1	7,86	-0,083
110	0,25	97,8	0,1	1	7,36	0,333
110,4	0,4	98	0,2	0,8	6,23	-0,458
110,6	0,2	98,1	0,1	0,7	5,71	-0,291
110,8	0,2	98,2	0,1	0,6	5,23	0,375
111	0,2	98,3	0,1	0,5	4,7	0,416
111,2	0,2	98,4	0,1	0,4	4,11	-0,291
111,3	0,1	98,45	0,05	0,35	3,89	0,291
111,4	0,1	98,5	0,05	0,3	3,63	0,375
112	0,6	98,8	0,3	0	2	0
112,2	0,2	98,9	0,1	-0,1	1,98	6,416
112,3	0,1	98,95	0,05	-0,15	1,15	-0,625
112,4	0,1	99	0,05	-0,2	1,15	2,708

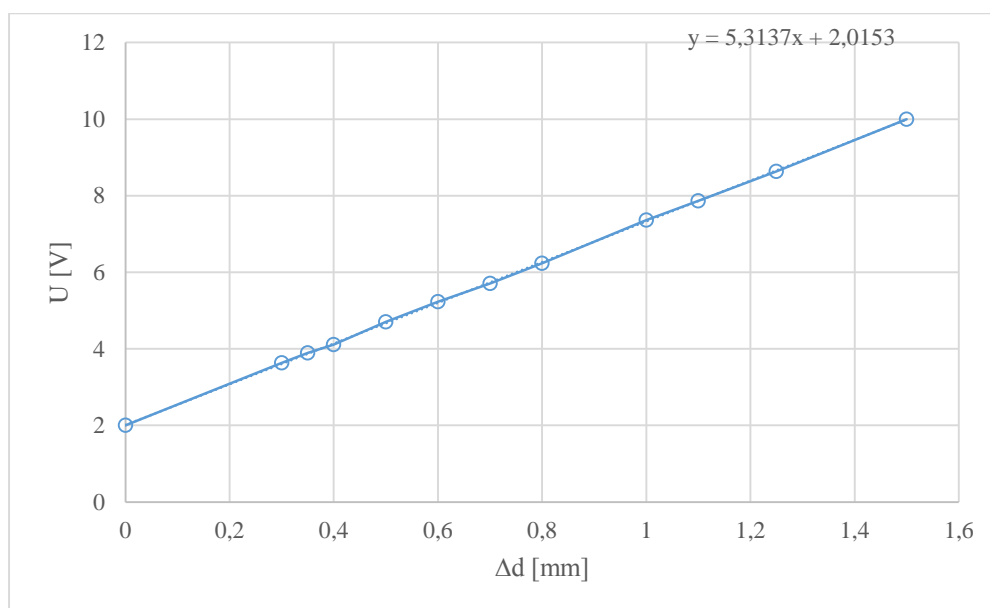
Podle teorie ohybu nosníku by změna výchylky v místě senzoru $d2$ ke změně výchylky v místě šroubu měla být v poměru 0,3238. V praxi ovšem tento poměr má hodnotu 0,4981, jak můžeme vidět v rovnici regrese na grafu 1. Důvodem může být špatné vetknutí nosníku, kde v místě sváru ramen se může nosník fyzikálně chovat odlišně. Také se může jednat o chybu měření posuvným měřítkem.



Graf 1: Poměr $d1$, $d2$

Ke zhodnocení správné funkčnosti a kvality senzoru je důležité testovat jeho linearitu. Výrobce udává chybu linearity menší než $0,02 \% \text{ FSO}$ (*Full Scale Output*). Pro testování nepoužijeme teoretické hodnoty průhybu nosníku, ale hodnoty skutečně naměřené d_2 . Nejprve bylo nutné spočítat z napětového rozsahu a rozsahu měření výchylky směrnici, dle které by se měly hodnoty měnit, tedy se kterými budeme naměřená data srovnávat. Směrnice vyjde $k = 5,333$ a počátek v hodnotě 2 V . V tabulce 2 můžeme vidět ve sloupci Θ , že chyba linearity nám vyšla do $0,5 \%$, což ani zdaleka neodpovídá udávané hodnotě výrobce. Výsledné hodnoty linearity jsou rozmístěny náhodně v důsledku nepřesnosti měření. Správnou funkčnost senzoru tedy nemůžeme potvrdit, avšak ani vyvrátit, protože se zde silně projevuje chyba měření digitálním posuvným měřítkem s přesností $0,01 \text{ mm}$ a voltmetrem s přesností $0,01 \text{ V}$. I přesto linearita do $0,5 \%$ je, jak můžeme vidět v grafu 2 velice solidním výsledkem.

Z tabulky je patrné, že mimo udávaný pracovní rozsah se chyba linearity zásadně zvyšuje.

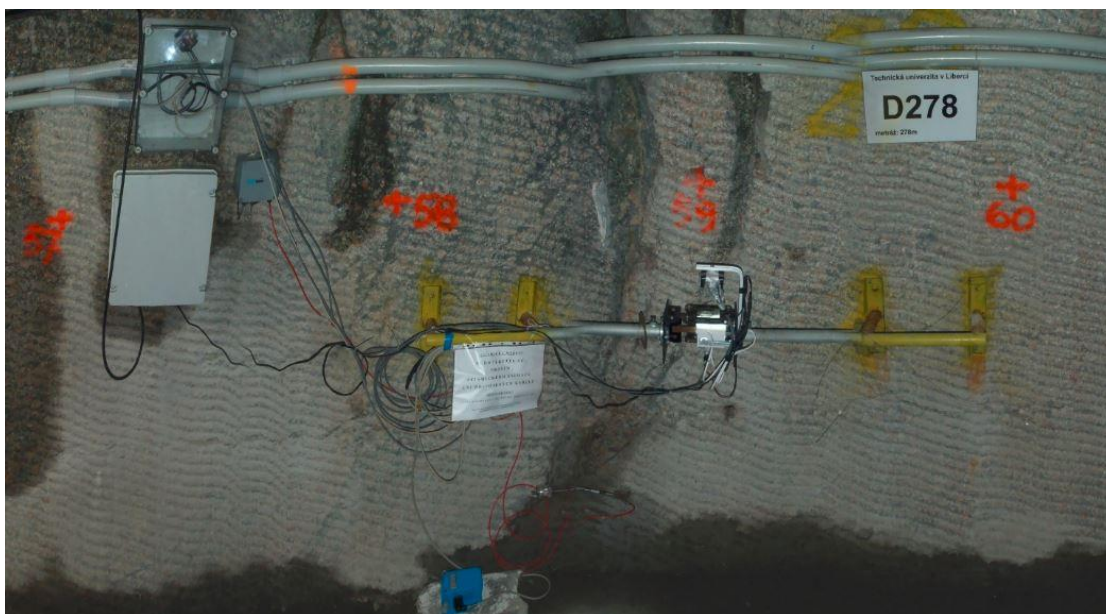


Graf 2: Linearita posunu na výstupním napětí

3 Výběr místa a osazení zařízení pro 3-osé měření posunu

V této kapitole se zabýváme vhodným výběrem místa a fyzickým upevněním měřidla ve štolě Bedřichov. Jedná se o zařízení, pomocí kterého je možné měřit malé posuny ve třech osách a jeho tvůrcem je Ing. Pluhař (viz 1.2.2). Hlavním kritériem pro výběr místa byla možnost porovnání výsledků, tedy umístění alespoň jednoho srovnávacího měřidla. Kvůli větším rozměrům zařízení, je dalším kritériem také dostatek místa na stěně štoly, aby bylo možné vhodně a správně zařízení připevnit. V neposlední řadě, také přístup k elektrické energii, která je sice v celé štolě, ale pouze na určitých stanovištích je vyvedena do rozvaděče.

Výběr místa vzhledem ke zvoleným kritériím, vzal v úvahu stanoviště na 235 m, 278 m, 792 m a 881 m od začátku štoly. Na stanovištích na 792 m a 881 m je ovšem upevněno pouze terčové měřidlo *TM71*, pro měření mikro posunů. Z tohoto důvodu, byla vhodnější stanoviště na 235 m a 278 m, kde kromě terčového měřidla *TM71* se nacházejí i strunové přístroje pro měření malých posunů *Geokon Model 4422 Monuments Crackmeters*. Bohužel na stanovišti 235 m, bylo málo místo pro správné upevnění a tak nejvhodnějším místem bylo stanoviště na 278 m (viz obr. 14).



Obr. 14: Panoramatická fotografie ze stanoviště 278 m před upevněním

Na obrázku 15 je zobrazena připevněná konstrukce. Tuto konstrukci navrhl Ing. Pluhař. První část je připevněna na jeden držák na třech závitových šroubech.

Druhá část je připevněna, z důvodu delšího rozměru a tedy pevnějšího uchycení na dvou držácích. Každý držák je připevněn na třech závitových šroubech.

Pro uchycení byl potřeba tento materiál:

- 9 × závitová tyč *M8* délky 150 mm,
- 18 × matice *M8*,
- 9 × podložka pod matice,
- tvrdnoucí vinylesterový tmel *CF900* od firmy Pattex,
- vázací drát.



Obr. 15: Uchycená konstrukce

Před samotnou instalací držáku bylo potřeba si naměřit vzdálenost šroubů na držáku a označit si kam do stěny vrtat. Vyvrtání děr o průměru 10 mm do hloubky cca 10 mm muselo proběhnout kolmo ke stěně, aby závitové tyče přišroubované k držáku šly zasunout až do požadované délky. Před aplikací chemické kotvy (vinylesterový tmel *CF900*) bylo potřeba vyvrtané otvory vyčistit pomocí kartáčku, aby nedošlo ke znehodnocení funkčnosti tmelu. Po aplikování tmelu do děr se následně zasunul držák se závitovými tyčemi. Kvůli správnému tvrdnutí tmelu, byl držák pomocí vázacího drátu upevněn ke stropu, aby vlivem gravitace, se příliš nepohnul nebo úplně nevypadl ze stěny. Uchycení můžeme vidět na obrázku 16.



Obr. 16: Uchycení držáku konstrukce

4 Vyhodnocení měření

V této kapitole jsou vyhodnocena data z měření Geokon Model 4422 Monuments Crackmeters a 3-osého zařízení pro měření deformace horniny.

4.1 Geokon

Měření posunu pomocí Geokon Model 4422 Monuments Crackmeters probíhalo na 278 m štoly. Data byla odebírána z dataloggeru Geokon Model LC-2 Single Channel v 30minutových intervalech. Sonda je připevněna na puklině vodorovně ve směru štoly. Její umístění vidíme na obrázku 17.



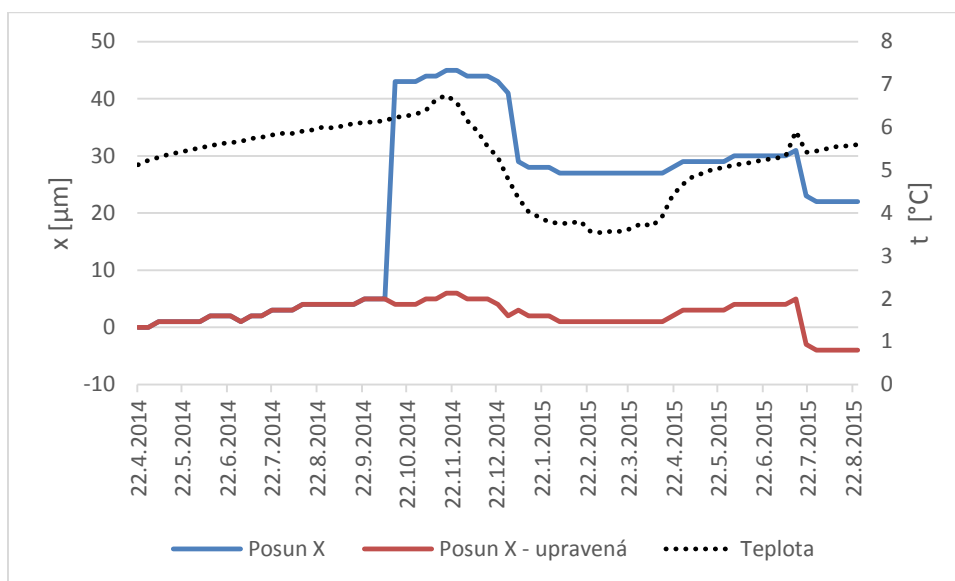
Obr. 17: Umístění sondy Geokon na 278 m štoly

V tabulce 3 nejsou všechna naměřená data. Datum je zde pouze pro srovnání s druhým měřením pomocí 3-osého zařízení (viz 4.2). Datalogger ukládá data o stavu baterie, teploty senzoru a loggeru a posun zaznamenává v mm na tisícinu přesnosti. V tabulce je posun x přepočítán, aby se jednalo pouze o výchylku od prvního záznamu.

Tab. 3: Naměřená a upravená data Geokonů

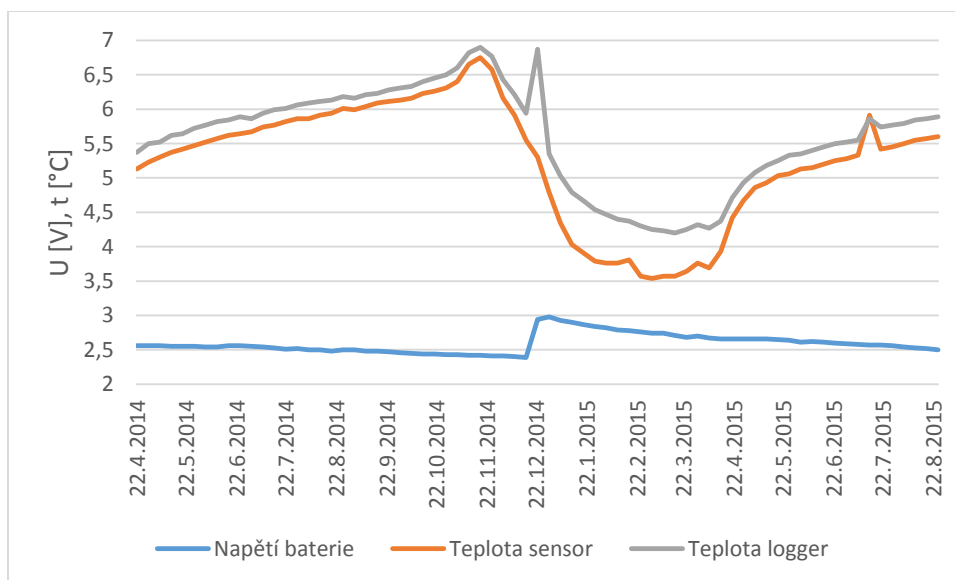
Datum	Baterie [V]	T senzor [°C]	T logger [°C]	x [μm]	x _{upr} [μm]
22. 4. 2014	2,56	5,13	5,37	0	0
25. 4. 2014	2,56	5,18	5,4	0	0
6. 5. 2014	2,56	5,3	5,52	1	1
9. 5. 2014	2,55	5,33	5,57	1	1
15. 5. 2014	2,55	5,37	5,62	1	1
19. 6. 2014	2,56	5,62	5,86	2	2
3. 7. 2014	2,55	5,69	5,91	2	2
10. 7. 2014	2,53	5,74	5,96	2	2
17. 7. 2014	2,53	5,79	5,99	3	3
15. 8. 2014	2,49	5,94	6,13	3	3
2. 9. 2014	2,5	5,99	6,16	4	4
11. 9. 2014	2,49	6,04	6,23	4	4
18. 9. 2014	2,48	6,09	6,23	5	5
3. 10. 2014	2,46	6,16	6,31	5	5
3. 12. 2014	2,4	6,13	6,4	44	5
23. 12. 2014	2,94	5,3	6,45	43	4
12. 1. 2015	2,9	4,05	4,81	28	2
26. 1. 2015	2,85	3,86	4,54	28	2
10. 2. 2015	2,79	3,81	4,4	27	1
23. 2. 2015	2,76	3,59	4,3	27	1
16. 3. 2015	2,71	3,54	4,2	27	1
18. 3. 2015	2,71	3,62	4,18	27	1
23. 3. 2015	2,7	3,59	4,27	27	1
8. 4. 2015	2,67	3,62	4,2	27	1
22. 4. 2015	2,66	4,54	4,79	29	3
9. 5. 2015	2,66	4,89	5,15	29	3
20. 5. 2015	2,65	5,03	5,28	30	4
4. 6. 2015	2,62	5,13	5,37	30	4
3. 7. 2015	2,58	5,33	5,52	30	4
14. 7. 2015	2,6	5,64	5,89	31	5
28. 8. 2015	2,51	5,62	5,91	22	-4
18. 9. 2015	2,49	5,82	6,12	20	-6

V grafu 3 je znázorněn vliv teploty na posun v čase. U naměřené hodnoty si všimněme tří anomálií. Změny z 9. 10. 2014 a 4. 1. 2015 jsou skokové, kdy měřený posun se změnil nárazově o 39 respektive -10 μm . Pravděpodobným důvodem vzniku těchto změn je lidský faktor, kdy mohlo dojít ke kontaktu se sondou. Z toho důvodu byla do tabulky 3 přidána hodnota x_{upr} , která tuto skokovou změnu eliminuje. Další prudká změna je mezi dny 14. 7. 2015 – 16. 7. 2015, kdy se nejedná o skokovou změnu nýbrž o změnu spojitou. Tato změna může být způsobena počasím.



Graf 3: Vliv teploty na posun v čase

V grafu 4 jsou zobrazeny stav napětí loggeru, teplota loggeru a senzoru. Zvýšení napětí z 22. 11. 2014 je způsobeno výměnou baterie. Tím je nárazově ovlivněna i teplota loggeru. Z grafu je patrné, že hodnota teploty loggeru je vždy vyšší než teplota senzoru.



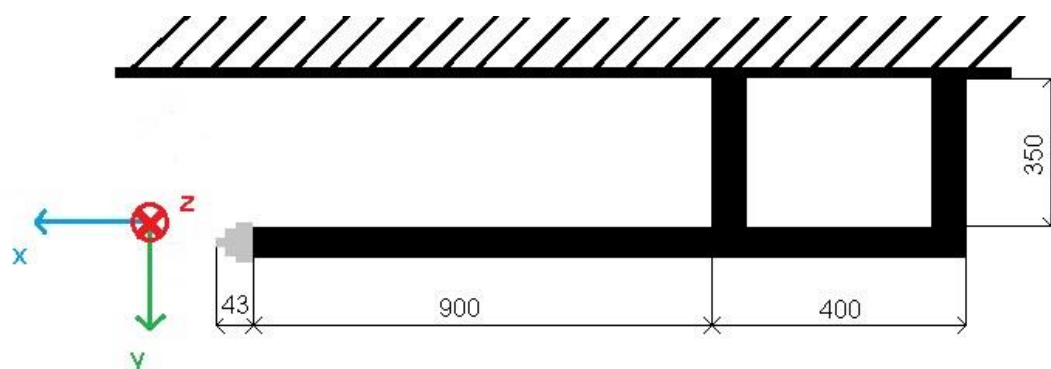
Graf 4: Vývoj napětí baterie a teplot v čase

4.2 Měření posunu 3-osým zařízením

Měření posunu pomocí 3-osého zařízení ve štolě Bedřichov probíhalo na 278 m od začátku štoly. Data v tuto fázi byla odebírána ručně během návštěv štoly, a tedy byla shromažďována v delších, méně pravidelných intervalech. V budoucnu by měla být tato data shromažďována automaticky pomocí dataloggeru.

Oproti předchozímu měření Geokonem probíhá toto měření ve třech osách. Nejprve jsme zpracovali neupravená data z úchylkoměrů. Kvůli délce konstrukce a principu měření je potřeba kompenzovat naměřená data.

V tabulce 4 vidíme odečtené hodnoty úchylkoměrů v osách x , y a z , teplotu ve štolě a kdy byla v jakém úchylkoměru měněna baterie. Naměřené hodnoty pomocí úchylkoměrů jsou změnami od doby spuštění měření. Z tabulky je patrné, že baterie je třeba měnit zhruba jednou za půl roku. Nákres upnutí konstrukce a orientaci os (šipka míří do kladného směru) vidíme na obrázku 18.



Obr. 18: Rozměry konstrukce a popis os

Tab. 4: Naměřené hodnoty zařízení pro 3-osé měření posunu

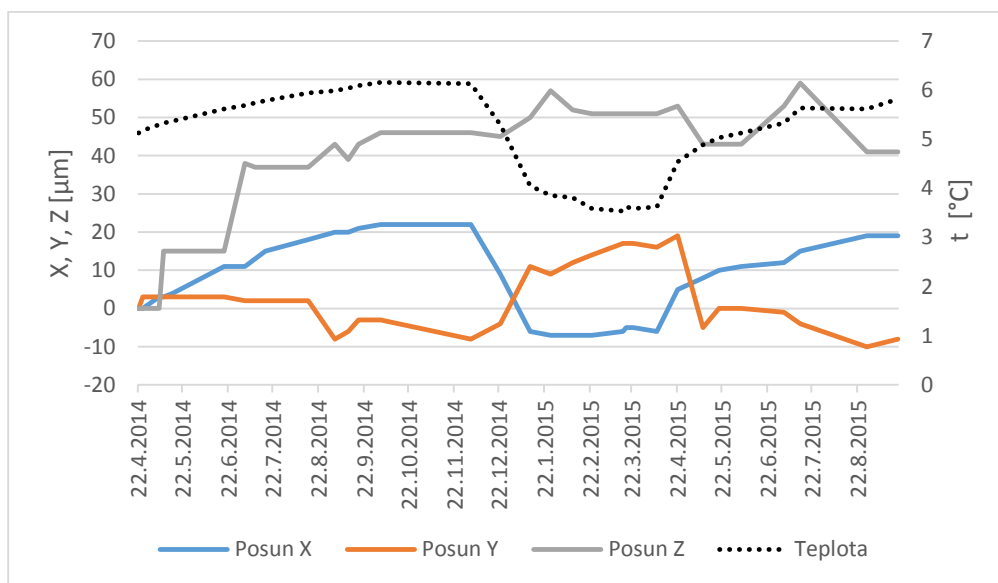
Datum	x [μm]	y [μm]	z [μm]	Teplota [$^{\circ}\text{C}$]	Výměna bat.
22. 4. 2014	0	0	0	5,13	0
25. 4. 2014	0	3	0	5,18	0
6. 5. 2014	3	3	0	5,3	0
9. 5. 2014	3	3	15	5,33	0
15. 5. 2014	4	3	15	5,37	0
19. 6. 2014	11	3	15	5,62	0
3. 7. 2014	11	2	38	5,69	0
10. 7. 2014	13	2	37	5,74	0
17. 7. 2014	15	2	37	5,79	0
15. 8. 2014	18	2	37	5,94	0
2. 9. 2014	20	-8	43	5,99	0
11. 9. 2014	20	-6	39	6,04	0
18. 9. 2014	21	-3	43	6,09	0
3. 10. 2014	22	-3	46	6,16	y
03. 12. 2014	22	-8	46	6,13	x, z
23. 12. 2014	9	-4	45	5,3	0
12. 1. 2015	-6	11	50	4,05	0
26. 1. 2015	-7	9	57	3,86	0
10. 2. 2015	-7	12	52	3,81	0
23. 2. 2015	-7	14	51	3,59	0
16. 3. 2015	-6	17	51	3,54	0
18. 3. 2015	-5	17	51	3,62	0
23. 3. 2015	-5	17	51	3,59	0
08. 4. 2015	-6	16	51	3,62	y
22. 4. 2015	5	19	53	4,54	0
9. 5. 2015	8	-5	43	4,89	0
20. 5. 2015	10	0	43	5,03	0
4. 6. 2015	11	0	43	5,13	x, z
3. 7. 2015	12	-1	53	5,33	0
14. 7. 2015	15	-4	59	5,64	0
28. 8. 2015	19	-10	41	5,62	0
18. 9. 2015	19	-8	41	5,82	0

V grafu 5 je znázorněn vývoj posunu ve všech osách v čase s porovnáním vývoje teploty, která je pro lepší názornost v grafu vynásobena deseti. Z grafu je patrné, že se posuny mění maximálně v desítkách μm . Výjimkou jsou data z počátku měření v ose z. Zde jsou patrné skokové změny hodnot. Důvodem může být ustálení konstrukce, kdy se tyč vlastní vahou ohýbá. Případně mohlo dojít ke skutečnému posunu horniny vlivem vnějších faktorů (např. změna počasí, otřesy). Zároveň se může jednat i o chybu měření při odečtu dat, kdy mohlo dojít k nechtěnému doteku zařízení.

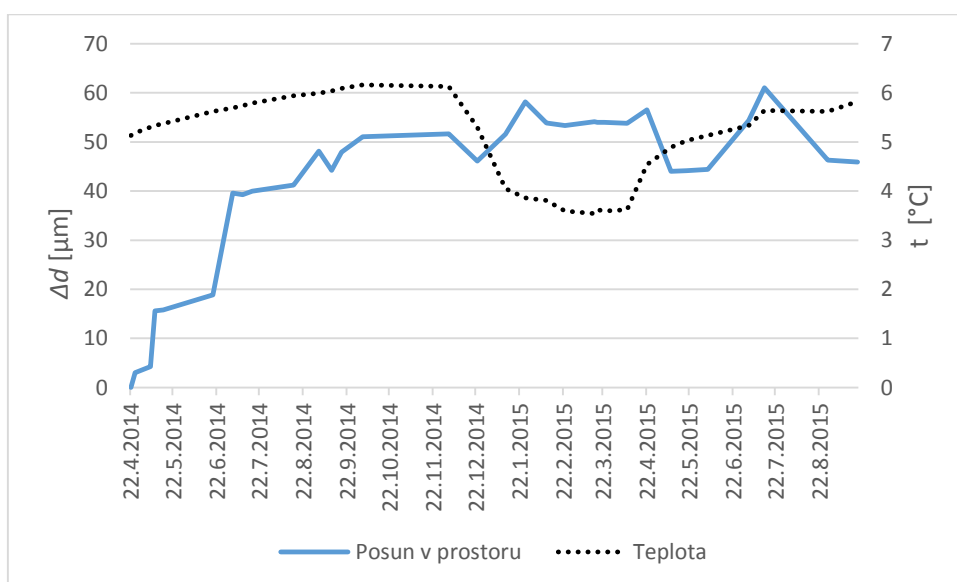
Na grafu 6 je vidět pohyb v prostoru, součet úchylek všech tří os, v závislosti na čase, opět porovnání s teplotou. Tato hodnota vychází ze vztahu (2)

$$\Delta d = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \quad (2)$$

Tato hodnota je absolutní, tedy vychází z první hodnoty jako z referenční. Z grafu je patrné, jak velký vliv zde má osa z, na zpracované výsledky. Tato data ovšem nepočítají s délkovou teplotní roztažností, která má vliv na konstrukci.



Graf 5: Posuny ve třech osách v závislosti na čase



Graf 6: Posun v prostoru v závislosti na teplotě

Na měření má vliv teplotní délková roztažnost. Tento jev se projevuje tak, že při zahřátí tělesa o určitou teplotu se délka tělesa zvětší. Teplotní délkou roztažnost je třeba kompenzovat odečtením od naměřené hodnoty. Vztah pro teplotní délkovou roztažnost vidíme na rovnici (3)

$$\Delta l = \alpha l_o \Delta t, \quad (3)$$

$$\Delta t = t - t_o, \quad (4)$$

kde α je teplotní součinitel délkové roztažnosti, l_o je délka tělesa při referenční teplotě t_o , a Δt je změna teploty, t odpovídá teplotě, pro kterou délkou roztažnost počítáme.

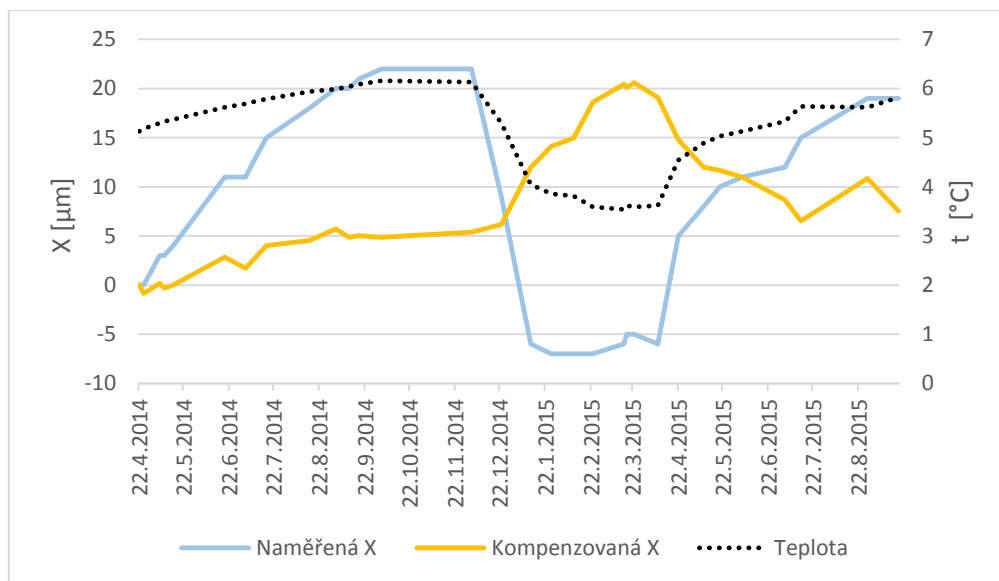
Teplotní dilatace má vliv na všechny tři osy měření. Osa y a osa z, mají vliv pouze v místě, na které doléhají hroty úchylkoměrů. Z obrázku 7 víme, že materiál, který se má rozpínat má rozměr 12 mm. Vlivem teploty se může celá konstrukce ohýbat v různých směrech, avšak dále neuvažujeme. Z tabulky 3 víme maximální a minimální hodnotu teploty. Teplotní součinitel délkové roztažnosti pro hliník $\alpha = 24 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$. Ze vztahu pro teplotní délkovou roztažnost, tedy lze spočítat o kolik se teoreticky maximálně rozpínal materiál v ose y a z. Maximální rozdíl teplotní délkové roztažnosti vyšel 0,75 μm , z toho můžeme vyvodit závěr, že vliv roztažností v osách y a z, je zanedbatelný.

V ose x musíme počítat, jak s délkou železné konstrukce (1,3 m), tak i délkou opracované krychle z hliníku (43 mm). Teplotní součinitel délkové roztažnosti pro ocel $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} K^{-1}$. V tabulce 5 jsou vypočítané hodnoty délkové roztažnosti v ose x. Hodnota X_{komp} je posun v ose x po odečtení dilatace. Vliv roztažnosti je zde již velký a značně ovlivňuje naměřená data

Tab. 5: Vypočtené hodnoty délkové roztažnosti v ose x

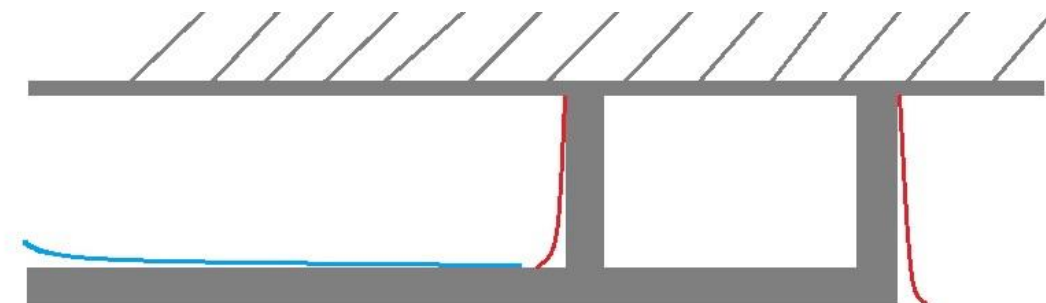
Datum	x [μm]	Teplota [$^{\circ}\text{C}$]	Δl hliník [μm]	Δl ocel [μm]	Δl [μm]	X_{komp}
22. 4. 2014	0	5,13	0	0	0	0
25. 4. 2014	0	5,18	0,051	0,78	0,831	-0,831
6. 5. 2014	3	5,3	0,175	2,652	2,827	0,172
9. 5. 2014	3	5,33	0,206	3,12	3,326	-0,326
15. 5. 2014	4	5,37	0,247	3,744	3,991	0,008
19. 6. 2014	11	5,62	0,505	7,644	8,149	2,850
3. 7. 2014	11	5,69	0,577	8,736	9,313	1,686
10. 7. 2014	13	5,74	0,629	9,516	10,145	2,854
17. 7. 2014	15	5,79	0,681	10,296	10,977	4,022
15. 8. 2014	18	5,94	0,835	12,636	13,471	4,528
2. 9. 2014	20	5,99	0,887	13,416	14,303	5,696
11. 9. 2014	20	6,04	0,939	14,196	15,135	4,864
18. 9. 2014	21	6,09	0,990	14,976	15,966	5,033
3. 10. 2014	22	6,16	1,062	16,068	17,130	4,869
3. 12. 2014	22	6,13	1,032	15,6	16,632	5,368
23. 12. 2014	9	5,3	0,175	2,652	2,827	6,172
12. 1. 2015	-6	4,05	-1,114	-16,848	-17,962	11,962
26. 1. 2015	-7	3,86	-1,310	-19,812	-21,122	14,122
10. 2. 2015	-7	3,81	-1,362	-20,592	-21,954	14,954
23. 2. 2015	-7	3,59	-1,589	-24,024	-25,613	18,613
16. 3. 2015	-6	3,54	-1,640	-24,804	-26,444	20,444
18. 3. 2015	-5	3,62	-1,558	-23,556	-25,114	20,114
23. 3. 2015	-5	3,59	-1,589	-24,024	-25,613	20,613
8. 4. 2015	-6	3,62	-1,558	-23,556	-25,114	19,114
22. 4. 2015	5	4,54	-0,608	-9,204	-9,812	14,812
9. 5. 2015	8	4,89	-0,247	-3,744	-3,991	11,991
20. 5. 2015	10	5,03	-0,103	-1,56	-1,663	11,663
4. 6. 2015	11	5,13	0	0	0	11
3. 7. 2015	12	5,33	0,206	3,12	3,326	8,673
14. 7. 2015	15	5,64	0,526	7,956	8,482	6,517
28. 8. 2015	19	5,62	0,505	7,644	8,149	10,850
18. 9. 2015	19	5,82	0,712	10,764	11,476	7,523

V grafu 7 vidíme porovnání naměřené hodnoty a hodnoty s kompenzací dilatace. Zároveň je v grafu zobrazena. Zajímavostí je pokles teploty ve štolě až koncem prosincem 2014, kdy během měsíce se teplota snížila o dva stupně. Tento faktor měl velký vliv na naměřenou hodnotu.



Graf 7: Porovnání naměřené hodnoty a hodnoty s vlivem dilatace

Další vliv na konstrukci má samotná teplotní dilatace horniny. Žula má součinitel tepelné roztažnosti $\alpha = 4,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Vycházíme z předpokladu, že dilatace horniny v osách y a z , nemá vliv na konstrukci. Z toho důvodu je potřeba porovnat délkovou roztažnost v ose x mezi konstrukcí a žulou v místě uložení konstrukce. Vypočtená délková roztažnost horniny pro maximální rozdíl naměřených teplot vyšla $4,57 \mu\text{m}$ a pro konstrukci $12,48 \mu\text{m}$. Rozdíl délkové roztažnosti žuly a konstrukce má vliv na pnutí konstrukce. Ta je tímto ovlivněna v ose y . Na obrázku 19 je znázorněno pomocí červených křivek, jakým směrem, se konstrukce v místě uložení bude pohybovat, vlivem dilatace horniny. Naopak modrá křivka, znázorňuje ohyb způsobený, deformací v místě uložení konstrukce. Takto malé pnutí, se ovšem na deformaci konstrukce neprojeví příliš znatelně.



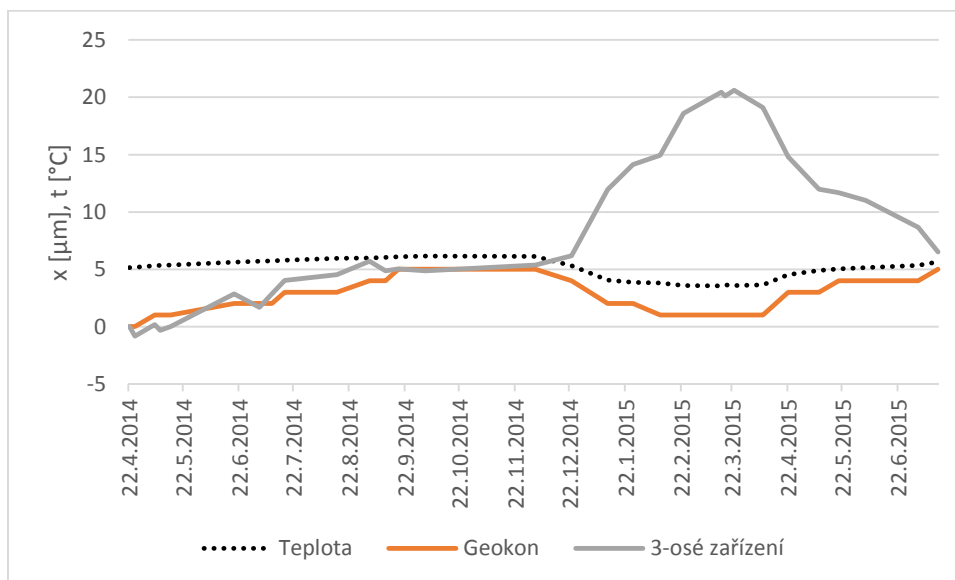
Obr. 19: Pohyb konstrukce vlivem dilatace horniny

5 Porovnání přístrojů pro měření deformace

V praxi byly odzkoušeny dva přístroje pro měření deformace horniny. Konkrétně Geokon Model 4422 Monuments Crackmeters a zařízení pro měření posunu ve třech osách (3-osé zařízení). Oba dva přístroje byly nainstalovány na stejné puklině ve štole Bedřichov. Naměřené výsledky můžeme tedy mezi sebou porovnat a analyzovat výhody a nevýhody uvedených přístrojů.

Pro 3-osé zařízení byla data odečítána ručně, proto porovnáváme i data pro Geokon ze stejných dnů. Jelikož Geokon měří pouze v jedné ose, srovnáváme ho s osou x 3-osého zařízení pro měření deformace horniny.

V grafu 8 jsou znázorněna měření na stejné puklině pomocí Geokonu a 3-osým zařízením pouze v ose x včetně vlivu dilatace. Je vidět, že data z prvních osmi měsíců spolu prakticky korespondují. Větší rozdíl nastává 21. 12. 2014 při prudkém ochlazení ve štole, kdy na konstrukci 3-osého zařízení má velký vliv změna teploty, zatímco Geokon dokáže změny teploty kompenzovat. Bohužel po návratu k teplotám, kde naměřená data korespondovala, se již charakteristiky k sobě nevrátí. Důvodem mohou být změny vlastností konstrukce vlivem změny teploty. Zajímavý by mohl být pohled na následující data, zda by došlo ke zpětné podobnosti ve výchylce.



Graf 8: Porovnání posunů v ose x a času

Výhoda využití 3-osého zařízení, oproti senzoru Geokon, spočívá právě v možnosti měření ve všech třech osách, nelze totiž předpokládat pouhé zvětšování

pukliny. Bohužel na konstrukci působí faktory jako délková teplotní dilatace konstrukce, tak i dilatace konstrukce v uložení. Ta může způsobovat další ohyby konstrukce v určitých směrech, které je velmi komplikované určit a odfiltrovat.

Můžeme tedy říct, že geokon je vhodnější pro jednodušší měření. Oproti zařízení pro měření ve třech osách dokáže kompenzovat teplotní změny, tudíž je teplotně stabilnější. Téměř po celou dobu si drží konstantní hodnoty a i přesto, že došlo v naměřených datech ke skokové změně posunu, kterou bych dával za vinu lidskému faktoru, avšak mohlo dojít i k náhlému tektonickému pohybu. V případě lidského faktoru jsme schopni chybu eliminovat upravením naměřených dat.

Vhodným senzorem pro využití ve štole je senzor LVDT. Je vysoce odolný, přesný, pracuje při teplotě od 0 do +70 °C a vlhkosti od 5 do 95 %. Tyčka pohybující se vně jádra se nijak nedotýká jiných prvků, tedy se pohybuje bez tření. Díky tomu nedochází k opotřebení senzoru, a tím se prodlužuje jeho životnost. Pro umístění senzoru by bylo vhodné navrhnout konstrukci. Tato konstrukce by měla splňovat vysokou tuhost, přesně zvolené a co nejmenší rozměry. Upevněna by měla být, co nejblíže k puklině.

Závěr

V této bakalářské práci jsme se věnovali měření deformace horniny ve vodárenském převaděči Bedřichov. Předmětem práce bylo seznámení se problematikou přístrojů, ověření jejich funkčnosti. Cílem práce bylo praktické měření ve štole a porovnání výhod a nevýhod použitých přístrojů.

Provedli jsme laboratorní měření pomocí LVDT senzoru pro otestování před použitím v terénu. K provedení testovacího měření byla navržena ocelová konstrukce. Bohužel z výsledků nebylo možné potvrdit parametry udávané výrobcem, ale ani je vyvrátit. Dále byl v laboratoři otestován datalogger DLCH10, vyrobený na Technické Univerzitě v Liberci, u kterého nebyly zjištěny problémy funkčnosti včetně možnosti vzdáleného přístupu. Problém nastal při umístění do štol, kde nejspíš jeho vinou docházelo k výpadkům elektrické energie, a proto bylo jeho umístění do štol odloženo.

Do štol v Bedřichově jsme upevnili konstrukci se zařízením pro měření deformace horniny ve třech osách. Bylo vybráno místo na 278 m od začátku štol. Toto místo bylo vybráno z důvodu dobré dostupnosti na stěně štol a možnosti porovnání se strunovým přístrojem pro měření deformace horniny Geokon Model 4422 Monuments Crackmeters.

Vyhodnocení dat nám přineslo informace o vhodnosti použití různých přístrojů k měření deformace horniny ve štole Bedřichov. Největším problémem se ukázala být změna teploty. V případě Geokonu měla teplota vliv pouze na rozpínání horniny, jelikož senzor má vlastní teplotní kompenzaci. Tedy naměřená hodnota byla reálná. S využitím konstrukce se zařízením na měření posunu ve třech osách nastal problém s fyzikálními jevy působící na celou soustavu. Samotnou konstrukci ovlivňovala teplotní délková roztažnost. Tento jev jsme byli schopni eliminovat. Dalším vlivem ovlivňujícím měření byla délková roztažnost horniny. Ocelová konstrukce, jež byla upnuta do žulového masivu ve dvou bodech, má jinou délkovou roztažnost nežli žula. Tedy docházelo k rozdílnému posunu v místě uchycení a na samotné konstrukci. To mělo za důsledek ohyb konstrukce v místě měření, který jsme nebyli schopni eliminovat. K omezení těchto vlivů by bylo nejspíš celou konstrukci zmenšit a přiblížit k měřenému místu. Z těchto důvodů je vhodnější sonda Geokon.

Zajímavým pokračováním by bylo praktické využití LVDT senzoru ve štole Bedřichov. Bylo by nutné vyřešit návrh a instalaci konstrukce a následně provést

porovnání již použitých přístrojů. Dalším možným pokračováním by mohla být optimalizace konstrukce zařízení pro měření posunu ve třech osách.

Seznam použité literatury

- [1] VOJÁČEK, A. Jak pracují LVDT snímače pro měření pohybu či detekci přiblížení? Automatizace.hw.cz [online]. © 1997–2014 [cit. 12. 4. 2015]. Dostupné z:
<http://automatizace.hw.cz/jak-pracuji-lvdt-snimace-pro-mereni-pohybu-ci-detekci-priblizeni>
- [2] MICRO-EPSILON. Instruction Manual MSC710 [online manuál]. © b. r. [cit. 20. 4. 2015]. Dostupné z:
<http://www.micro-epsilon.com/download/manuals/man--MSC710--en.pdf>
- [3] PLUHAR, T., HERNYCH, M. a HOKR, M. Zařízení pro měření malých posunů ve třech osách [užitný vzor č. 26727]. Zapsán dne 7. 4. 2014.
- [4] KOŠTÁK, B. (1977): Terčové měřidlo TM-71 a jeho užití pro měření velmi pomalých pohybů na poruchách a trhlinách.- Inženýrské Stavby 25, 5, 213-218. Praha.
- [5] VOTÁPEK, J. (2012): Zprovoznění a otestování senzorů pro terénní měření posunutí puklin. Liberec. Ročníkový projekt. Technická Univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií. Vedoucí projektu doc. Ing. Milan Hokr, PhD.
- [6] GEOKON. Instruction Manual Model 4422 Monument Crackmeter. [online manuál]. © 2006, 2008, 2013, 2015 [cit. 27. 5. 2015]. Dostupné z:
http://www.geokon.com/content/manuals/4422_Monument_Micro_Crack_meter.pdf
- [7] GEOKON. Model 8002 series (LC-2, LC-2A, LC-2x4, LC-2x16). LC-2 Series Dataloggers [online manuál]. © 2015 [cit. 28. 5. 2015]. Dostupné z:
http://www.geokon.com/content/datasheets/8002_Series_Dataloggers.pdf
- [8] BERAN, L. (2012): Datalogger DLCH10 záznamová ústředna s ethernet grafickým rozhraním, Funkční vzorek, Technická Univerzita v Liberci.